

農業環境技術研究所 室長

小林 和彦

「CO<sub>2</sub> 倍増時の生態系のFACE実験とモデリング」

## 1. 研究実施の概要

大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は、氷河期が約 1 万年前に終わって以来、およそ 280 ppmV (1 ppmV は体積比率で 100 万分の 1) 前後で推移していたが、18 世紀後半から上昇を始め、とりわけ 20 世紀半ば過ぎから急上昇を続け、2000 年現在の CO<sub>2</sub> 濃度は約 370ppmV である。20 世紀後半の CO<sub>2</sub> 濃度の急上昇は、石炭・石油などの化石燃料の燃焼による CO<sub>2</sub> 放出が主な原因であり、今後の CO<sub>2</sub> 濃度の推移もまた、人間活動からの CO<sub>2</sub> 放出量の推移に依存する。例えば気候変動枠組み条約に基づく京都議定書で定められた CO<sub>2</sub> 放出量削減が実行されると、大気 CO<sub>2</sub> 濃度は今世紀後半に約 550 ppmV になると予想される。18 世紀以前の CO<sub>2</sub> 濃度のほぼ 2 倍になるわけであるが、CO<sub>2</sub> 排出削減が不調だと、それが今世紀前半に早まる。また、CO<sub>2</sub> 濃度を今世紀末までに 550 ppmV で安定させるためには、先進国は CO<sub>2</sub> 排出量を現在の半分以下に削減し、途上国も同程度に厳しい削減が必要である。いずれにせよ、今世紀後半に、CO<sub>2</sub> 濃度が 550 ppm 程度になるのは避けられない情勢である。

植物は光合成作用により、光エネルギーを使って、空気中の CO<sub>2</sub> を固定して炭水化物を生成する。光合成速度は、大気 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇につれて、飽和型の曲線を描いて増加するので、植物の種によっては、現在の CO<sub>2</sub> 濃度ですでに光合成がほぼ飽和しているが、多くの植物では CO<sub>2</sub> 濃度が高まると光合成速度も上昇し、炭水化物がより多く生成される。炭水化物は、呼吸基質としてエネルギー源となり、また植物体を構成する主成分でもあるので、それが多くできれば、植物の生長は盛んになる。また、CO<sub>2</sub> 濃度が高まると植物は、葉の気孔を閉じて蒸散量を減らす。植物としては、気孔を余り開けなくても、CO<sub>2</sub> を取り込めるので、水消費が少なくて済む。CO<sub>2</sub> 濃度が増えると、こうして光合成が促進され気孔開度が減少するので、植物は少ない水消費でより多く生長できる。

大気 CO<sub>2</sub> の増加は、植物の生長変化を通して、陸上生態系全体に影響を及ぼし、ひいては気候にも影響する。例えば、気孔が閉じて植物の蒸散が減ると、植生 - 大気間のエネルギー交換が変化する。一方、植物の生長促進で、空気中の CO<sub>2</sub> がより多く植生に固定されるが、その際に樹木の木部が増えれば、炭素として割合長期間生態系に止まるが、葉が増えれば、1 - 2 年後に落葉して分解され、速やかに大気 CO<sub>2</sub> に戻る。それゆえ、CO<sub>2</sub> 増加に対して植物の生長がどのように応答するかが重要である。CO<sub>2</sub> 濃度上昇による植物の生長変化は、食糧生産にとっても大きな意味がある。農作物の生長が盛んになるために、穀類の生産性が高まり、水利用効率は向上する。人口増加に伴う食糧と水の需要増加が今後予想されるだけに、生産性の向上自体はむしろ歓迎すべき変化である。

本研究プロジェクトは、アジアに特徴的な生態系である水田について、大気 CO<sub>2</sub> 増加がイネの生長とコメ生産性、そして水田生態系の物質やエネルギーの流れに及ぼす影響を、FACE 実験とモデリングによって解明するために実施した。ここで FACE とは、Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment、すなわちフィールドに何も囲いをしないで、空気中に CO<sub>2</sub> を放出し、植生のまわりの CO<sub>2</sub> 濃度を高める実験方法である。将来 CO<sub>2</sub> 濃度が高くなった時の生態系の変化を、直接観測できるため、近年急速に広まってきた研究手法で、世界約 20 ヶ所で現在 FACE 実験が行われている。本プロジェクトは、世界最初のイネの FACE 実験プロジェクトであり、また、アジアで最初の FACE プロジェクトでもあった。

CO<sub>2</sub> 濃度が高まると植物の光合成が高まり、生長が盛んになることについては、すでに 100 年間以上にわたって研究がなされ、温室栽培に実用化されている。そうした膨大な研究蓄積に、FACE 実験が新たに付け加えるのは何だろうか。

- ・ 一つは、今までの温室やチャンバーを使った実験では完全に払拭できなかった、アーティファク

トの無い実験条件で、CO<sub>2</sub>濃度上昇が植物の生長に及ぼす影響を、定量的に解明することである。これにより、将来のCO<sub>2</sub>濃度上昇の影響を、より確かに知ることができるようになる。

- ・ もう一つは、今までの実験は、生態系の一部を言わば切り取って来て実験装置の中に置き、CO<sub>2</sub>濃度の影響を調べていたが、FACE ではインタクトな生態系で、CO<sub>2</sub>濃度を上昇させた時に生じる変化を、多様な専門の研究者が研究することができる。このことにより、生態系の変化をより広く知ることができるようになる。

FACE が 1987 年頃にアメリカで開発された当初は、これこそアーティファクトの無い、言わば理想の実験手法であると考えられた。それ以前の温室やチャンバーに比べれば、植物の生育環境への影響は確かに減った。最初の FACE 装置は、米国ブルックヘブン研究所の G. Hendrey らによって、実現されたもので、CO<sub>2</sub>を一たん空気希釈し、それをパイプから吹き出すことにより、植物群落周辺のCO<sub>2</sub>濃度を高めている。ところがその後の研究で、この方式はFACEの目的に反して、植物群落の微気象に影響を及ぼすことが分かってきた。多量の空気の吹き込みが群落上の空気の混合を促し、無風時の植物群落の熱収支を変えるのである。これを「ブロー効果」と呼ぶ。実際に、アリゾナのFACE実験では、FACE区のコムギの発育が進み、対照区より約1週間も早く成熟に達する結果となったが、これはCO<sub>2</sub>の効果でなくて、ブロー効果のためであることが、後に確かめられた。ブローで外気を吹き込む「ブロー対照区」を設けて、FACE区と比べたところ、発育促進がほとんど見られなかったのである。そこで、最近のアメリカのFACE実験では「ブロー対照区」とFACE区の比較でCO<sub>2</sub>の効果を測るようにしている。

本研究では、FACEの理想に立ち返り、アーティファクトの無いFACE実験を目指して、ブローを使わないFACE装置を開発した。開発したFACE装置は、予備希釈しない純CO<sub>2</sub>を、空気中に直接吹き出すもので、ブロー効果が無いほか、コンパクトで低消費電力という特長を持つ。ブローが無い分、CO<sub>2</sub>濃度制御が難しく、特に低風速時に放出したCO<sub>2</sub>が拡散混合しにくい、アーティファクトがほとんど無いという長所は、CO<sub>2</sub>濃度制御性能の短所を十分に埋め合わせる。本研究により、世界で初めて開発された純CO<sub>2</sub>放出型FACEは、その後イタリアのポプラFACEや、アメリカのダイズFACEに採用され、より自然な状態でのFACE実験に役立っている。

FACE装置の開発と並行して、FACE実験場の整備を進め、1997年に岩手県雫石町南畑の農家水田にCO<sub>2</sub>貯蔵・供給施設を建設、1998年から2000年までの3年間、同所の農家水田を借用してFACE実験を行った。FACE実験における観測・測定項目は多岐にわたったが、イネの生長への影響と水田生態系への影響に大きく分かれ、それぞれごとにグループを構成した。それら実験グループの他に、FACE装置を開発した「FACEシステム開発グループ」が、実験期間中のFACE装置の運転に当たり、本プロジェクトの目的の一つである、プロセスモデリングには、「モデリング・データ解析グループ」が当たった。同グループはまた、FACE実験の統計学的デザインと、実験結果の解析を研究した。「FACEシステム開発グループ」の成果は前記したが、その他のグループの成果は、以下のとおりである。

#### イネ生長影響解析グループ

FACE実験の結果から、CO<sub>2</sub>濃度が現在から200ppmV増加すると、コメ収量は約10%増加すると推定された。この収量増加率は、過去のチャンバーを使った実験結果よりもやや小さいように見えるが、

雫石の気温が稲栽培期間中平均で 20 前後と低いことを考慮に入れば、従来の結果の範囲内である。しかし、FACE の実験結果でもっと重要な発見は、CO<sub>2</sub> 濃度上昇によるイネの生長や収量の増加率が定数でないことである。例えば、窒素肥料の量を半減すると収量は減り、高 CO<sub>2</sub> 濃度での収量増加率は 5%程度に低下する。ところが、窒素量を現在より 50%増やすと、収量が増えても高 CO<sub>2</sub> 濃度での収量増加率は変わらない。窒素肥料以外にも、生育時期、器官、品種によって、生長に及ぼす CO<sub>2</sub> 濃度上昇の影響が大きく異なることが、FACE 実験とクライマトロン・チャンパー実験の両方で明らかになった。

ではなぜ、CO<sub>2</sub> の効果は変動するのか？一枚の葉の光合成速度と CO<sub>2</sub> 濃度との関係に着目すれば、光合成の順化と呼ばれる現象があり、高 CO<sub>2</sub> 濃度下で生育が進むにつれて、CO<sub>2</sub> に対する光合成の応答が低下するのは、光合成の順化のためとされる。しかし、FACE 実験結果からは、生育後期に光合成速度の CO<sub>2</sub> 濃度への応答が低下する現象は、むしろ CO<sub>2</sub> 濃度上昇によって生じるバイオマス生長の促進が、窒素の吸収・分配の変化を通して、個葉の光合成にフィードバックした結果ではないかと考えられる。窒素肥料の量によって、コメ収量の CO<sub>2</sub> 増加に対する応答が異なる現象も、同様に窒素の吸収と分配によって（少なくとも定性的には）説明できるだろうし、さらに白米中のタンパク含量が FACE によって低下するのも、窒素吸収と関連する。

#### 水田生態系影響解析グループ

CO<sub>2</sub> 濃度上昇に対するイネの生長応答は、上記の通り窒素吸収と深く関わっているが、では植物が吸収できる窒素量が、大気 CO<sub>2</sub> 増加の影響を受けることは無いだろうか。FACE とクライマトロン・チャンパー実験の結果では、土壌表層・下層のどちらでも、高 CO<sub>2</sub> 濃度下で窒素固定活性が高まった。ただし、投入された窒素肥料が多いと、窒素固定活性は抑制されるので、この実験結果は、窒素の供給が制約になっている自然の湿地などにおいて、より大きな意味を持つかも知れない。

CO<sub>2</sub> 濃度上昇は、土壌の炭素代謝にも影響することが、FACE 実験で明らかになった。微生物バイオマスとして土壌中に存在する炭素量は、FACE によって増え、しかも窒素固定活性とは逆に、窒素施肥量が多い場合に、その効果が大きかった。また、水田の嫌気性土壌における炭素代謝の産物であるメタンの放出量は、高 CO<sub>2</sub> 濃度によって増加することが、FACE とチャンパー実験の両方で確かめられた。観測されたメタン放出量の増加率には、19%から 145%まで大きな開きがあり、同様の現象が自然湿地で生じるかどうか不明だが、大気 CO<sub>2</sub> の増加がメタン放出量を増やすことは、地球温暖化予測にとって重大である。

水田生態系には土壌と大気の間水層があり、その中でも炭素・窒素同化作用が営まれている。水面で光合成を行っているアオウキクサが、FACE によって増え、それによって、水面を通しての CO<sub>2</sub> の流れが変わることが観測された。現在の CO<sub>2</sub> 濃度では、水層はつねに CO<sub>2</sub> の放出源であったが、高 CO<sub>2</sub> 濃度では、水層が CO<sub>2</sub> を吸収する時間帯が日中に見られた。

本プロジェクトでは、この他、CO<sub>2</sub> 濃度上昇による群落蒸発散量の変化を、FACE 圃場における微気象学的観測とモデルによって推定した。高 CO<sub>2</sub> 濃度では気孔が閉じるため、葉面積当たりの蒸散量が減り、その結果、数パーセントから 10%程度、群落蒸発散量が減少するものと推定された。

高 CO<sub>2</sub> 濃度環境では、病原微生物に対するイネの感受性も変化する。イネ最大の病害であるいもち病への感受性が、FACE によって高まることが 1998 年に観測されたが、それ以降の 2 年間には同様の結果は得られなかった。いもち病に次いで重要なイネの病害である、紋枯病の発病株率は、FACE

で明らかに高まった。ただしそれは、窒素施肥量が通常の 60%以上多い場合で、窒素肥料が少ない場合には、差は認められなかった。

#### モデリング・データ解析グループ

上記のように、FACE とチャンバー実験によって、大気 CO<sub>2</sub> の増加が、イネ、水層、土壌表層及び下層において、炭素と窒素の流れに影響を及ぼすことが明らかになった。観測結果はしかし、言わば事実の断片に過ぎず、そこから大気 CO<sub>2</sub> 増加時のイネの生長や生態系の変化の全貌を明らかにするためには、プロセスモデルの助けが必要である。モデリング・データ解析グループの主な任務は、イネの生長や生態系の動きのプロセスモデルを、FACE 実験結果で検証し、必要であれば改良することであった。

イネ生長プロセスモデリングには、確立されたモデルとしては ORYZA1 と SIMRIW、新しいモデルとして JAPONICA を用いた。予め、対照区の実測データで、パラメータ調節等をしておいたモデルで、FACE 区の生長をシミュレートした。SIMRIW は実測値と近いシミュレーション結果となったが、ORYZA1 は葉面積が大幅に過大となり、そのために CO<sub>2</sub> 増加に対するバイオマス量の応答も過大となった。SIMRIW が葉面積は CO<sub>2</sub> によって変化しないと仮定しているのに対して、ORYZA1 はバイオマスの一定部分を葉身に分配し、それを葉面積の生長に変換しているためである。

なお ORYZA1、SIMRIW とともに、窒素の吸収と分配・再分配を明示的に記述していないため、前記のような、バイオマス生長と窒素吸収の関わりをシミュレートすることはできない。そこで、シンプルながらも窒素吸収過程を明示的に記述した、新しいタイプのモデル JAPONICA によって、窒素肥料施用量が異なる場合の、イネの生長に及ぼす CO<sub>2</sub> 濃度上昇の影響をシミュレートした。その結果、モデルはバイオマス量と窒素保有量の推移を、かなり良く実測をシミュレートできた。

イネの生長や、群落熱収支・蒸発散、あるいは土壌プロセスのモデリングは、本プロジェクト終了後も継続して実施する予定である。

## 2. 主な研究成果

### (1) 論文発表 (国内誌 7件、国際誌 12件)

- Cheng, W., Inubushi, K., Yagi, K., Sakai, H. and Kobayashi, K. (2001). Effects of elevated CO<sub>2</sub> on biological nitrogen fixation, nitrogen mineralization and carbon decomposition in submerged rice soil. *Biology and Fertility of Soils* 34, 7-13.
- Gregory, P.J., Ingram, J.S.I., and Kobayashi, K. (2000). Rice production and global change. *Global Environmental Research*, 3, 71-77.
- 犬伏和之 (1999). 土壌環境について 炭素循環とガス代謝を中心とし. *CELSS 学会誌* 12 (1), 39-47.
- Kim, H.Y., Lieffering, M., Miura, S., Kobayashi, K., and Okada, M. (2001). Growth and nitrogen uptake of CO<sub>2</sub>-enriched rice under field conditions. *New Phytologist* 150, 223-229.
- 小林和彦 (2001). FACE (開放系大気 CO<sub>2</sub> 増加) 実験. *日本作物学会紀事* 70, 1-16.
- Kobayashi, K., Lieffering, M. and Kim, H.-Y. (2001). Growth and yield of paddy rice under free-air CO<sub>2</sub> enrichment. In M. Shiyomi and H. Koizumi eds. *Structure and Function in Agroecosystem Design and Management*, CRC Press, Boca Raton, USA, p. 371-395.
- Kobayashi, K., Okada, M., and Kim, H.-Y. (1998). The Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) for rice in Japan. *Proceedings of the International Symposium: World Food Security and Crop Production Technologies for Tomorrow* (Kyoto, Japan) p. 213-215.
- Kobayashi, K., and Salam, M.U. (2000). Comparing simulated and measured values using mean squared deviation. *Agronomy Journal*, 92, 345-352.
- 小林和彦、モイン・ウス・サラム (1998). 増えゆく大気 CO<sub>2</sub> とアジアのコメ. *農業および園芸* 73 巻 8 号 857-863 頁.
- Koizumi, H., Kibe, T., Mariko, S., Ohtsuka, S., Nakadai, T., Mo, W., Toda, H., Nishimura, S., and Kobayashi, K. (2001). Effect of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on CO<sub>2</sub> exchange at the flood-water surface in a rice paddy field. *New Phytologist* 150, 231-239.
- Kurata, K., Kondo, S. and Kobayashi, K. (1997). Fundamental study for developing a concentration-gradient FACE system. *Journal of Agricultural Meteorology*, 52, 782-786.
- Norby, R., Kobayashi, K. and Kimball, B.A. (2001). Rising CO<sub>2</sub>- future ecosystems. *New Phytologist* 150, 215-221.
- Okada, M., Hamasaki, T. and Sameshima, R. (2000). Pre-air-conditioned temperature gradient chambers for research on temperature stress in plants. *Biotronics*, 29, 43-55.
- Okada, M., Lieffering, M., Nakamura, H., Yoshimoto, M., Kim, H.Y. and Kobayashi, K. (2001). Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) with pure CO<sub>2</sub> injection: system description. *New Phytologist* 150, 251-260.
- Ono, K., Ishimaru, K., Aoki, N., and Ohsugi, R. (1999). Transgenic rice with low sucrose-phosphate synthase activities retain more soluble protein and chlorophyll during flag leaf senescence. *Plant Physiology and Biochemistry* 37, 949-953.
- Sakai, H., Yagi, K., Kobayashi, K. and Kawashima, S. (2001). Rice carbon balance under elevated CO<sub>2</sub>. *New Phytologist* 150, 241-249.
- Salam, M.U., Jones, J.W., and Kobayashi, K. (2001). Predicting nursery growth and transplanting shock in rice. *Experimental Agriculture* 37, 65-81.
- Salam, M.U., Kobayashi, K., Kim, H.-Y., and Okada, M. (1998). Phasic development of rice seedlings under elevated CO<sub>2</sub> and temperature regimes. *Proceedings of the International Symposium: World Food Security and Crop Production Technologies for Tomorrow* (Kyoto, Japan) p. 207-211.
- Toda, H., Tanaka, S, Koizumi, H., Kobayashi, K., Okada, M., Kim, H.-Y., and Kawashima, H. (2000). Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on the nitrogen utilization by rice under field conditions: a result from Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment with rice. *システム農学* 16, 74-78.

### (2) 口頭発表

#### 招待、口頭講演 (国内 37件、国際 3件)

- Kobayashi, K., H.Y. Kim, M. Lieffering and M. Okada: Amount of nitrogen fertilizer alters the response of rice yield to CO<sub>2</sub> enrichment in the field. *Abstracts of FACE 2000 Conference*, p.5 (2000年6月).
- Koizumi, H., Kibe T., Nakadai T., Bekku Y., Tang Y., Kawashima H., Kobayashi K. and S. Mariko. Carbon dynamics and budgets in upland and paddy agricultural ecosystems in monsoonal East Asia. 第7回国際生態学会 (VII International Congress of Ecology) (イタリア・フローレンス). *INTECOL Proceedings*, p. 232 (1998年7月)
- Okada, M., M. Lieffering, H. Nakamura, M. Yoshimoto, H.Y. Kim and K. Kobayashi: Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) with pure CO<sub>2</sub> injection: Rice FACE system design and performance. *Abstracts of FACE 2000 Conference*, p.2 (2000年6月).

- 青木直大、石丸健、廣瀬竜郎、酒井英光、佐々木治人、小林和彦. イネ葉身の糖代謝に対する高 CO<sub>2</sub> 処理の影響 - 出穂期の止葉葉身における炭水化物含量の変化. 日本作物学会第 207 回講演会 (1999 年 4 月 2-3 日)
- 程為国、犬伏和之、Md. M. Hoque、小林和彦、三浦周、金漢龍、岡田益己. 高 CO<sub>2</sub> が水田圃場におけるメタンの動態に及ぼす影響. 日本土壌肥料学会関東支部大会. (1999 年 6 月 10 日)
- 程為国、犬伏和之、八木一行、酒井英光、小林和彦. 二酸化炭素濃度上昇が水田土壌中の窒素固定活性および炭素、窒素無機化に及ぼす影響. 日本土壌肥料学会 2000 年度大会. 講演要旨 p. 200. (2000 年 4 月 2 日)
- 濱崎孝弘、岡田益己、金漢龍. CO<sub>2</sub> 濃度が水稻の生育ステージに及ぼす影響の TGC 試験. 日本農業気象学会 1999 年度全国大会. 講演要旨 p. 198-199. (1999 年 7 月 30 日)
- 犬伏和之、青沼伸一、Md. M. Hoque、程為国、小林和彦、三浦周、金漢龍、岡田益己. CO<sub>2</sub> 濃度上昇が水田からのメタンと亜酸化窒素の放出に及ぼす影響. 日本土壌肥料学会 2000 年度大会. 講演要旨 p. 199. (2000 年 4 月 2 日)
- Inubushi, K., Hoque, M.M., Aonuma, S., Miura, S., Kobayashi, K., Okada, M., Kim, H.-Y. and Yabashi, S.. Dynamics of soil microbial biomass carbon and nitrogen in paddy soil as influenced by free air CO<sub>2</sub> enrichment. 日本土壌肥料学会 2000 年度大会. 講演要旨 p. 200. (2000 年 4 月 2 日)
- 犬伏和之、Md. M. Hoque、程為国、三浦周、小林和彦、岡田益己、金漢龍、矢橋晨吾. Effect of elevated CO<sub>2</sub> on soil microbial biomass in FACE paddy fields. 日本土壌肥料学会. 講演要旨 p. 271. (1999 年 7 月 31 日)
- 門良成、蔵田憲次. FACE における Blower Effect の解析. 日本農業気象学会関東支部会. (講演要旨なし). (1997 年 11 月 28 日)
- 木部剛、中台利枝、鞠子茂、唐艶鴻、小泉博. 小型多チャンネル CO<sub>2</sub> フラックス測定システムの開発. 第 45 回日本生態学会大会. 講演要旨 p. 113. (1998 年 3 月 27 日)
- 金漢龍、岡田益己、小林和彦、吉田光二. 水稻の登熟過程におよぼす高 CO<sub>2</sub> 濃度の影響. 日本作物学会. 講演要旨 日作紀 67 巻別号 1 p. 96-97. (1998 年 4 月 3 日)
- 小泉博、木部剛、中台利枝、西村誠一、別宮有紀子、鞠子茂. 水田生態系における炭素動態・収支の現況と FACE プロジェクトによる将来. 予測. 第 44 回日本生態学会. 講演要旨 122 頁. (1997 年 3 月 27 日)
- 近藤智、蔵田憲次. 濃度勾配型 FACE 実験装置の開発. 日本農業気象学会関東支部会. 講演要旨なし. (1997 年 11 月 28 日)
- 近藤智、蔵田憲次、小林和彦. 濃度勾配型 FACE システム開発のための実験. 日本農業気象学会 1998 年度全国大会・日本生物環境調節学会 1998 年大会・1998 年度農業施設学会大会 合同大会. 講演要旨 72-73 頁. (1998 年 7 月 30 日)
- 黒田栄喜、阿部陽、田中大介、宋鳳斌、平野貢、金漢龍、岡田益己、小林和彦. FACE (Free-air CO<sub>2</sub> enrichment) が水稻品種「ふくひびき」の生育と収量に及ぼす影響. 日本作物学会第 210 回講演会. 講演要旨 p.166-167.(2000 年 10 月 5 日)
- Li, Z., Yagi, K., Sakai, H. and K. Kobayashi. Influence of elevated CO<sub>2</sub> and N nutrition on rice plant growth, soil microbial biomass and soil carbon dynamics. 日本土壌肥料学会. 講演要旨 p. 275. (1999 年 7 月 30 日)
- Lieffering, M., Okada, M., Kobayashi, K. and H.Y.Kim. Temporal and spatial control of CO<sub>2</sub> concentrations in the Rice FACE (Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment) Facility, Iwate, Japan, 1998. 日本農業気象学会 1999 年度全国大会. 講演要旨 p.162-163. (1999 年 7 月 30 日)
- 鞠子茂、大浦典子、小泉博、小林和彦、木部剛、関川清広. タマガヤツリの成長に対する高 CO<sub>2</sub> 濃度の影響. 日本雑草学会第 37 回講演会. 講演要旨 . (1998 年 3 月 30 日)
- 鞠子茂、関川清広、木部剛、小林和彦、小泉博. 零石 FACE 実験水田における雑草発消長調査法の検討. 日本雑草学会第 37 回講演会. 講演要旨. (1998 年 3 月 30 日)
- 三浦周、小林和彦、金漢龍、Mark Lieffering、岡田益己. 大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が水稻の乾物生産、窒素吸収に及ぼす影響. 日本土壌肥料学会 1999 年度関東支部大会. 講演要旨 p. 26. (1999 年 6 月 10 日)
- 三浦周、小林和彦、岡田益己、金漢龍. 大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が水稻体内における乾物・窒素分配に及ぼす影響. 日本土壌肥料学会 1999 年度大会. 講演要旨 p. 130. (1999 年 7 月 31 日)
- 三浦周、佐々木治人、Hoque Md. Mozammel、小林和彦、金漢龍、岡田益己. 大気 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇がイネの炭素・窒素分配に及ぼす影響. 日本土壌肥料学会 2000 年度大会. 講演要旨 p. 101. (2000 年 4 月 2 日)
- 森田茂紀、阿部淳、小林和彦、金漢龍、岡田益己、中村浩史、Mark Lieffering. FACE 条件下における水稻の登熟期の出液速度と根系形態. 日本作物学会第 209 回講演会. (2000 年 4 月 7 日)
- 岡田益己、金漢龍. 灌水チューブを用いた FACE 用純 CO<sub>2</sub> ガスの放出. 日本農業気象学会 1997 年度全国大会・日本生物環境調節学会 第 3 5 回集会合同大会. 講演要旨: 282-283 頁. (1997 年 6 月 8 日)
- 岡田益己、中村浩史、金漢龍、小林和彦. 純 CO<sub>2</sub> 放出型 FACE 装置の制御と性能. 日本農業気象学会 1998 年度全国大会・日本生物環境調節学会 1998 年大会・1998 年度農業施設学会大会合同大会. 講演要旨 388-389 頁. (1998 年 7 月 30 日)
- 三枝正彦、山川泰弘、山本晶子、岡田益己、小林和彦. FACE 環境下における水稻 "あきたこまち" の養分吸収. 日本土壌肥料学会. 講演要旨 p. 131. (1999 年 7 月 30 日)
- 酒井英光、八木一行、小林和彦、川島茂人. 高 CO<sub>2</sub> 濃度大気が水稻群落の CO<sub>2</sub> 収支に及ぼす影響. 日本農業気象学会 1999 年度全国大会. 講演要旨 p. 472-473. (1999 年 7 月 30 日)
- 酒井英光、八木一行、小林和彦、矢島正晴. 高 CO<sub>2</sub> 濃度下の植物生長・ガス交換研究用チャンパーシステム. 日本農業気象学会 1998 年度全国大会. 講演要旨 444-445 頁. (1998 年 7 月 30 日)
- 瀬山和幸、蔵田憲次. ニューラルネットワークによる濃度勾配型 FACE の制御. 日本農業気象学会 2000 年度全国大

会. 講演要旨 194-195 頁. (2000 年 8 月 24 日).

田丸洋、後藤雄佐、斎藤満保、中村聡、菅井恵介、岡田益己、金漢龍、小林和彦. 高 CO<sub>2</sub> 大気下水田における葉色の推移. 日本作物学会第 210 回講演会. 講演要旨 p.42-43. (2000 年 10 月 5 日).

田丸洋、後藤雄佐、斎藤満保、中村聡、菅井恵介、岡田益己、金漢龍、小林和彦. 高 CO<sub>2</sub> 大気下水田における水稻の分げつ性. 日本作物学会第 210 回講演会. 講演要旨 p.44-45. (2000 年 10 月 5 日)

寺尾富夫、廣瀬竜郎、長田健二、黒田栄喜、阿部陽、平野貢、小林和彦. シンク-ソースバランスが異なる水稻品種の CO<sub>2</sub> 倍増時における登熟性. 日本作物学会第 207 回講演会. 講演要旨 (1999 年 4 月 2-3 日)

戸田任重、田中信乃、小林和彦、金漢龍、岡田益己. CO<sub>2</sub> 濃度倍増が水田の窒素循環に及ぼす影響. 日本土壌肥料学会関東支部大会. 講演要旨 p. 26. (2000 年 6 月 10 日)

山川泰弘、三枝正彦、金漢龍、岡田益己、小林和彦. FACE 環境下の水稻に対する穂肥の効果. 日本土壌肥料学会 2000 年度大会. 講演要旨 p. 135. (2000 年 4 月 2 日)

吉本真由美、小林和彦. Rice FACE における熱収支と蒸発散量. 日本農業気象学会 1999 年度全国大会. 講演要旨 p. 56-57. (1999 年 7 月 30 日)

吉本真由美、小林和彦. 高 CO<sub>2</sub> 条件下での水田の微気象特性. 日本農業気象学会関東支部 1998 年度例会. 講演要旨 p. 22-23. (1998 年 11 月 19 日)

吉本真由美、小林和彦、金漢龍. 高 CO<sub>2</sub> 濃度条件下における水田生態系の蒸発散. 日本農業気象学会 2000 年度全国大会. 講演要旨 p. 192-193. (2000 年 8 月 24 日)

吉本真由美、小林和彦、F. Miglietta、A. Peressotti. 3次元 CFD モデルによる RiceFACE の CO<sub>2</sub> 拡散シミュレーション. 日本農業気象学会 1998 年度全国大会. 講演要旨 p. 44-45. (1998 年 7 月 30 日)

#### ポスター発表 (国内 1 件、国際 27 件)

Cheng, W., K. Inubushi, K. Yagi, H. Sakai and K. Kobayashi: Effects of Elevated CO<sub>2</sub> on Biological Nitrogen Fixation, Nitrogen Mineralization and Carbon Decomposition in Submerged Rice Soil. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.35 (2000 年 6 月).

Hoque, M.M., K. Inubushi, S. Miura, K. Kobayashi, H.Y. Kim, M. Okada and S. Yabashi: Effects of elevated CO<sub>2</sub> on soil microbial biomass in rice paddy. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.36 (2000 年 6 月).

Inubushi, K., W. Cheng, S. Aonuma, M.M. Hoque, K. Kobayashi, S. Miura, H.Y. Kim, and M. Okada: Effects of elevated CO<sub>2</sub> on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy field at the Rice FACE. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.37 (2000 年 6 月).

Inubushi, K., Cheng, W., Hoque, M.M., Kobayashi, K., Miura, S., Okada, M. et al. Effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment on methane emission and microbial biomass in paddy field soil. The GCTE Focus 3 Conference "Food and Forestry: Global Change and Global Challenges". University of Reading, UK. (September 20-23 1999).

Kibe, T., Nakadai, T., Mariko, S., Tang, Y., Kobayashi, K. and Koizumi, H.. Portable Multi-channel System for Measuring CO<sub>2</sub> Flux on Soil Surface. 第 7 回国際生態学会 (VII International Congress of Ecology) (イタリア・フローレンス) (1998 年 7 月)

Kim, H.Y., M. Lieffering, S. Miura, K. Kobayashi and M. Okada: Responses of paddy rice to Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE). Abstracts of FACE 2000 Conference, p.53 (2000 年 6 月).

Kitagawa, H., T. Yamagishi, H.Y. Kim, M. Okada and K. Kobayashi: The Effects of Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment on the Photosynthesis of the Flag Leaf in Rice Plants. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.26 (2000 年 6 月).

Kobayashi, K. and M. U. Salam. Testing and comparing rice growth models for their performance in simulating the effects of elevated CO<sub>2</sub> on rice. The GCTE Focus 3 Conference "Food and Forestry: Global Change and Global Challenges". University of Reading, UK. (September 20-23 1999)

Kobayashi, K., and M. U. Salam. Comparing Six Rice Growth Models under Four Diverse Environments in Asia: 2. Why they differ with each other? IGBP/GCTE-LUCC Open Science Conference (Barcelona, Spain). Abstract: pp. 146-147. Date of presentation: (March 15, 1998).

Koizumi, H., T. Kibe, W. Mo, T. Otsuka, H. Toda, S. Mariko and K. Kobayashi: Effect of Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) on CO<sub>2</sub> exchange between the water surface and the atmosphere in a paddy field. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.42 (2000 年 6 月).

Kurata, K., S. Kondo, and K. Kobayashi. Fundamental study for developing a concentration-gradient FACE system. International Symposium: Food Production and Environmental Improvement under Global Climate Change. Ube, Yamaguchi, Japan. Date of presentation. (July 30-August 2, 1996).

Marriott, D., S. Seneweera, T. Ashenden and K. Kobayashi: Stomatal responses to elevated CO<sub>2</sub> in rice grown under Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) and with different levels of nitrogen fertilization. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.30 (2000 年 6 月).

Miura, S., H. Sakai, M.M. Hoque, H.Y. Kim, M. Okada and K. Kobayashi: Carbon and nitrogen dynamics in rice plants under Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.54 (2000 年 6 月).

Morita, S., J. Abe, K. Kobayashi, H.Y. Kim, M. Okada, H. Nakamura and M. Lieffering: Physiological Activity and Morphology of Root System at Grain-Filling Stage in Rice Plants Grown under FACE conditions. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.57 (2000 年 6 月).

Nakajima, T., Kobayashi, T., Ishiguro, K., Murai, M., Yamamoto, A., Okada, M. et al.. Effect of elevated



- CO<sub>2</sub> on susceptibility of rice to blast. The GCTE Focus 3 Conference "Food and Forestry: Global Change and Global Challenges". University of Reading, UK. (September 20-23 1999)
- Okada, M., Kim, H.Y., Nakamura, H., Lieffering, M., Yoshimoto, M., and K. Kobayashi. Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment for rice: the system performance and changes in rice growth and yield. The GCTE Focus 3 Conference "Food and Forestry: Global Change and Global Challenges". University of Reading, UK. (September 20-23 1999)
- Sakai, H., K. Yagi, K. Kobayashi and S. Kawashima: Carbon balance of rice canopy under elevated CO<sub>2</sub> condition. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.28 (2000年6月).
- Salam, M. U., Kobayashi, K., Casanova, D., Qi, C.-H., Centeno, H.G., Hoogenboom, G., Ohnishi, M., and R.L. Williams. Comparing Six Rice Growth Models under Four Diverse Environments in Asia: 1. How they differ from observation? IGBP/GCTE-LUCC Open Science Conference (Barcelona, Spain) (March 15, 1998).
- Sasaki, H., N. Aoki, H. Sakai, T. Hara, K. Ishimaru and K. Kobayashi: Effect of elevated concentration of CO<sub>2</sub> on the distribution and translocation of carbon at early grain-filling stage in the rice plant. Abstracts of FACE2000 Conference, p.29 (2000年6月).
- Sasaki, H., T. Hara, S. Miura, M.M. Hoque, S. Ito, H.Y. Kim, M. Okada and K. Kobayashi: Analysis of carbon distribution in rice plants fed <sup>13</sup>C at elevated concentrations of CO<sub>2</sub>. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.27 (2000年6月).
- Seneweera, S., K. Kobayashi, M. Okada, K. Ishimaru, M. Lieffering, J.P. Conroy, O. Ghannoum, D. Marriot and H.Y. Kim: Photosynthetic acclimation to elevated CO<sub>2</sub> depends on ontogeny and sink strength. Interaction Between Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment and Nitrogen Supply on Rice. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.20 (2000年6月).
- Song, F., E. Kuroda, M. Hirano, H.Y. Kim, M. Okada and K. Kobayashi: Effect of Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) on the metabolism of carbohydrates. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.55 (2000年6月).
- Terao, T., T. Hirose, K. Nagata, H. Tabuchi, E. Kuroda, A. Abe, M. Hirano and K. Kobayashi: Effect of elevated CO<sub>2</sub> on the grain filling of rice cultivars with different sink-source balances. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.56 (2000年6月).
- Yagi, K., Z. Li, H. Sakai and K. Kobayashi: Effect of elevated CO<sub>2</sub> on methane emission from a Japanese rice paddy. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.40 (2000年6月).
- Yamakawa, Y., M. Saigusa, M. Okada and K. Kobayashi: Changes of Soil Solution Components of Paddy Soil under Elevated Atmospheric CO<sub>2</sub>. Abstracts of FACE2000 Conference, p.41 (2000年6月).
- Yoshimoto, M. and K. Kobayashi: Effects of Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment on Energy Balance and Evapotranspiration in Rice Paddy Field. Abstracts of FACE 2000 Conference, p.34 (2000年6月).
- Yoshimoto, M., K. Kobayashi, F. Miglietta and A. Peressotti: Numerical simulation of the CO<sub>2</sub> dispersion in Rice FACE System. Abstracts of FACE2000 Conference, p.45 (2000年6月).
- 木部剛、中台利枝、鞠子茂、唐艶鴻、小泉博. 携帯型マルチチャンネルCO<sub>2</sub>フラックス測定装置の開発. 第20回極域生物シンポジウム ポスター発表. (1997年12月5日)

### (3)特許出願(国内 1件、海外 1件)

#### 国内

発明者: 岡田益己、小林和彦、金漢龍、マーク リーフリング、中村浩史  
 名称: 植物種子の生産方法  
 出願番号: 特願2000-84123  
 出願日: 平成12年3月24日

#### 海外

発明者: 岡田益己、小林和彦、金漢龍、リーフリング マーク、中村浩史  
 名称: 植物種子の生産方法  
 出願番号: PCT/JP01/01962  
 出願日: 2001年3月13日

### (4) 新聞報道等

#### 新聞報道

1997年2月8日岩手日報1面「二酸化炭素の水稲影響実験 雫石で実施へ」  
 1997年8月21日毎日新聞岩手版「CO<sub>2</sub>濃度の上昇イネに影響 本格調査へ」  
 1997年8月22日岩手日報「CO<sub>2</sub>濃度上昇で何が起きるか 雫石の野外施設」  
 1997年10月1日朝日新聞夕刊5面「温暖化防止 研究最前線を行く 食料」  
 1997年10月15日化学工業日報「高CO<sub>2</sub>環境下のイネ生育実験 農環研、来年度から着手」  
 1997年11月3日聖教新聞8面「CO<sub>2</sub>濃度増やし稲の生育を研究」  
 1998年12月12日産経新聞岩手県版22面「CO<sub>2</sub>濃度を高めてコメ収穫 1割増」  
 1998年12月16日産経新聞夕刊一面「CO<sub>2</sub>高濃度 コメ収穫増」  
 1999年4月13日日本経済新聞38面「CO<sub>2</sub>濃度高まるとコメの収量増えるが病気への抵抗力弱く」

1999年4月13日信濃毎日新聞25面「大気中CO<sub>2</sub>濃度高まった場合コメ収量増加病害虫に弱く」  
1999年4月13日岩手日報20面「二酸化炭素濃度が上昇 コメは増収、イネは病弱に」  
1999年4月13日茨城新聞17面「CO<sub>2</sub>増加でコメ収量増加、でも病気への抵抗力は低下」  
1999年4月13日山形新聞24面「イネ - CO<sub>2</sub>濃度高まると収量増えるが病弱に」  
1999年4月19日商経アドバイス「高CO<sub>2</sub>でコメ増収」

その他

1999年3月12日NHK「おぼんですいわて」「地球温暖化でコメはどう変わるか」

(5) その他特記事項

本プロジェクトで開発された純CO<sub>2</sub>放出型FACEは、イタリアやアメリカでのFACE実験に活用されつつあり、さらに今後中国やインドなどでも利用が進むと期待される。